

YAG 荧光粉中稀土元素的提取^①

王君妍^{1,2}, 梅光军^{1,2}, 于明明³, 王鹏飞^{1,2}, 李怡霏^{1,2}, 严强^{1,2}

(1.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2.武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 3.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为了从钇铝石榴石(YAG)掺铈荧光粉中提取稀土元素 Y 和 Ce, 对其进行了直接酸浸和焙烧-酸浸实验, 探究了焙烧剂种类及用量、焙烧温度、焙烧时间及浸出温度、浸出时间等因素对 Y 和 Ce 浸出率的影响。结果表明, YAG 荧光粉结构性质稳定, Y 和 Ce 元素不是以简单的氧化物形式存在其中, 因此无法通过直接酸浸方法将其有效提取; 焙烧预处理能有效破坏 YAG 荧光粉的结构, 使稀土以氧化物形式存在, 有利于后续酸浸; 当 YAG 与 Na₂CO₃ 质量比 1:0.5、900 °C 下焙烧 2 h, 再在盐酸浓度 3 mol/L、液固比 20 mL/g、双氧水用量 1.2 mL/g、60 °C 下浸出 1 h, Y 和 Ce 浸出率分别可达 97.23% 和 84.91%。

关键词: 钇铝石榴石; 荧光粉; 浸出; 焙烧; 钇; 铈; 稀土

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.025

文章编号: 0253-6099(2025)05-0142-06

Extraction of Rare Earth Elements from YAG Fluorescent Powder

WANG Junyan^{1,2}, MEI Guangjun^{1,2}, YU Mingming³, WANG Pengfei^{1,2}, LI Yifei^{1,2}, YAN Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: To extract rare earth elements (REE) of yttrium (Y) and cerium (Ce) from yttrium aluminium garnet (YAG) fluorescent powder, experiments were performed for YAG by adopting direct acid leaching and roasting-acid leaching process, respectively. The effects of various factors on the leaching rates of Y and Ce were investigated, including roasting agent types and dosage, roasting temperature, roasting time, as well as leaching temperature and leaching time. It is shown that YAG fluorescent powder is stable in structure, while Y and Ce elements therein, not in the form of simple oxides, cannot be effectively extracted by direct acid leaching; a roasting pretreatment can effectively destroy the structure of YAG fluorescent powder, and convert the rare earth elements into oxides, which is beneficial to the following acid leaching process. After 2 h roasting at 900 °C with YAG and Na₂CO₃ in a mass ratio of 1:0.5, and then 1 h leaching at 60 °C with HCl at a concentration of 3 mol/L, a liquid-solid ratio of 20 mL/g, and 1.2 mL/g of hydrogen peroxide, the leaching rates of Y and Ce can reach 97.23% and 84.91%, respectively.

Key words: yttrium aluminium garnet (YAG); fluorescent powder; leaching; roasting; yttrium; cerium; rare earth

稀土元素是重要的战略资源, 因其独特的光电磁特性在多个前沿领域展现出关键作用^[1], 市场需求不断扩大^[2]。目前, 世界许多国家稀土元素储备失衡, 面临供应不足风险^[3], 因此稀土资源二次回收利用显得尤为重要^[4]。钇铝石榴石(yttrium aluminum garnet, YAG)掺

铈(Ce)荧光粉, 化学式为 Y₃Al₅O₁₀:Ce³⁺, 是由 Y₂O₃ 和 Al₂O₃ 反应生成的一种复合氧化物。YAG 荧光粉发光效率高、发射峰宽、化学性质稳定, 被广泛用于制造白光 LED。白光 LED 逐渐取代传统的白炽灯和荧光灯, 成为照明产业的主力产品^[5], 然而 LED 灯具具有一定寿

① 收稿日期: 2025-04-25

基金项目: 广西有色金属及特色材料加工重点实验室(2022GXYSOF11)

作者简介: 王君妍(2000—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废资源化。E-mail: 1330856179@qq.com

通信作者: 梅光军(1969—), 男, 湖南常德人, 教授, 主要从事绿色高效选冶药剂合成与性能评价。E-mail: meiguangjun@aliyun.com

命,废旧 LED 灯中含有的稀土元素 Y 和 Ce 应用于催化、磁性等领域,具有极高的回收利用价值,有效回收其中稀土元素,不仅有利于稀土资源可持续利用,而且有利于降低环境污染。

目前少有从 YAG 荧光粉中提取稀土元素的报道,但从三基色荧光粉中提取稀土元素的研究成果可为此类荧光粉的回收利用提供借鉴。三基色荧光粉由黄粉、绿粉和蓝粉按照一定比例混合而成^[6]。红粉中 Y 和 Eu 可通过直接酸浸法提取^[7]。绿粉和蓝粉为尖晶石结构,直接酸碱浸出很难从中提取稀土元素^[8],但经过焙烧再添加助浸剂浸出,Ce 和 Tb 浸出率可达 90%以上^[9]。本实验首先采用直接酸浸法提取 Y 和 Ce,浸出率不到 2%;而采用焙烧-酸浸法提取稀土元素,通过优化实验条件,获得了较高的 Y 和 Ce 浸出率。研究结果可为后续 YAG 荧光粉的回收利用提供技术依据。

1 实验

1.1 实验原料、试剂与设备

YAG 荧光粉由常熟市鑫联荧光材料有限公司提供,规格为 Y4454-15H,批次为 LB23033101。YAG 荧光粉属立方晶系,具有石榴石结构,石榴石的晶胞可看作是十二面体、八面体和四面体的链接网。YAG 的 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1 可知,YAG 的衍射峰基本上与钇铝石榴石的衍射峰(JCPDS, 33-0040)对应,少部分衍射峰与 Y_2O_3 的衍射峰(JCPDS, 41-1105)对应,表明 YAG 中钇铝石榴石纯度较高。

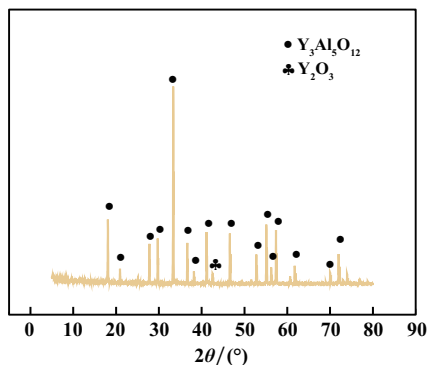


图 1 YAG 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of YAG

通过 X 射线荧光光谱对 YAG 化学成分进行分析,结果见表 1。稀土成分主要为 Y_2O_3 ,其次为 CeO_2 。

实验试剂主要包括黄粉、盐酸、碳酸钠等,均为分析纯。实验设备包括马弗炉、磁力搅拌恒温水浴锅、真空泵等。

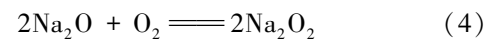
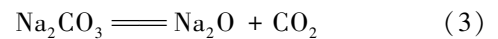
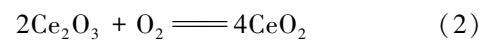
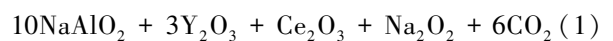
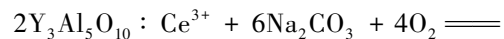
表 1 YAG 化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Analysis of chemical composition of YAG %					
Y_2O_3	Al_2O_3	CeO_2	F	BaO	其他
64.507	27.301	2.651	2.416	2.389	0.736

1.2 实验原理与方法

1.2.1 实验原理

通过焙烧^[10-12]改变 YAG 的结构和化学性质,使其中的稀土转化为其氧化物形式,更易于后续的酸浸。以碳酸钠为焙烧剂,在焙烧过程中,YAG 主要发生以下反应:



焙烧产物在盐酸浸出过程中发生以下反应:



1.2.2 实验方法

分别采用直接酸浸工艺、焙烧-酸浸工艺提取稀土元素。

直接酸浸实验:将 1 g YAG 与不同种类和浓度的酸装进锥形瓶,置于恒温加热磁力搅拌器中进行酸浸,酸浸后过滤、定容、稀释,取样进行 ICP 测定并计算稀土浸出率。

焙烧预处理-酸浸实验:将 1 g YAG 与不同种类焙烧剂混匀后置于坩埚中,在箱式电阻炉中进行焙烧预处理,焙烧后产物加入锥形瓶中,加入一定量的酸,将锥形瓶放入磁力搅拌水浴锅,在一定条件下浸出,浸出结束后过滤,对滤液进行定容后稀释,采用 ICP 测量稀释后液体中稀土元素含量并计算稀土浸出率。

1.3 分析方法

采用 ICP 分析法测定溶液中稀土含量,采用 STA449F3 型综合热分析仪,通过测量焙烧过程中物质质量变化^[13],推测 YAG 与焙烧剂开始发生反应和结束反应时的温度。

2 直接浸出实验

在盐酸浓度 4 mol/L、液固比 50 mL/g、60 °C 条件下浸出 4 h,考察了 HCl、 H_2SO_4 和混酸(体积比 1:1)对稀土浸出率的影响,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,HCl、 H_2SO_4 、HCl+ H_2SO_4 对稀土的浸出能力均较弱,浸出率不到 2%,这可能是由于 $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ 的

主要结构为钇铝石榴石(YAG),YAG 化学性质非常稳定,晶体结构非常牢固,常见的酸与YAG 几乎不发生反应,只有在非常强的酸如氢氟酸、高氯酸中,YAG 可能会发生一定程度的反应。从图2可以看出,HCl 对YAG 中Y 的浸出能力相对较强,后续采用HCl 进行酸浸。

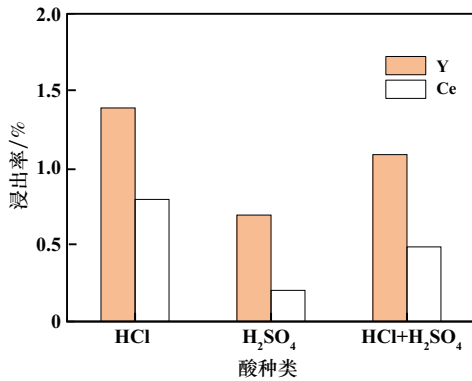


图2 酸种类对稀土浸出率的影响

Fig.2 Effect of acid type on leaching rates of REE

3 焙烧-浸出实验

3.1 DSC-TG-DTG 热分析

将质量比1:2的YAG 与碳酸钠混合均匀,在空气气氛下,以升温速率10 °C/min 从室温升至1 200 °C,对升温过程进行DSC-TG 分析,记录不同温度下样品的质量,DSC-TG-DTG 热分析结果如图3所示。由TG 曲线可知,从室温到850 °C左右,质量损失率为1.51%,继续加热至1 000 °C,样品失重率为9.49%。DTG 曲线显示在805.3 °C 峰谷处样品开始失重,说明为反应前兆。DSC 曲线显示在861.9 °C 时有一个内热峰,这是由于温度达到碳酸钠的熔点(851 °C),碳酸钠开始分解,与YAG 发生反应,生成新产物而导致热量发生变化,同时有水的生成,从而失重,直到1 060.2 °C,质量不再降低,可推断两者反应基本结束。

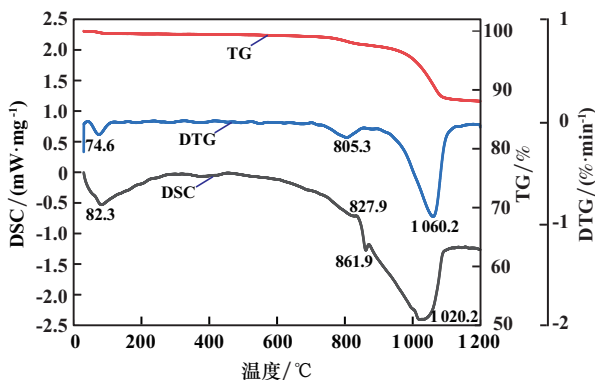


图3 DSC-TG-DTG 热分析结果

Fig.3 DSC-TG-DTG thermal analysis results

3.2 焙烧预处理

3.2.1 焙烧剂种类对稀土浸出率的影响

在焙烧温度900 °C、焙烧时间2 h、YAG 与不同焙烧剂质量比1:2条件下进行预处理,再用3 mol/L 盐酸在液固比20 mL/g、60 °C下浸出2 h,焙烧剂种类对稀土浸出率的影响如图4所示。从图4可以看出,Na₂CO₃为焙烧剂时效果较好,Y 浸出率可达84%,Ce 浸出率为73%。4种焙烧剂对YAG 的晶体结构破坏效果大小为:Na₂CO₃>NaOH>NaHCO₃>CaCO₃,YAG 在与前3种焙烧剂进行焙烧时,YAG 的结构被破坏,Y₃Al₅O₁₂分解为易溶于酸的Y₂O₃和Al₂O₃,焙烧产物再用酸浸出时Y 和Ce 能更好地被提取出来。

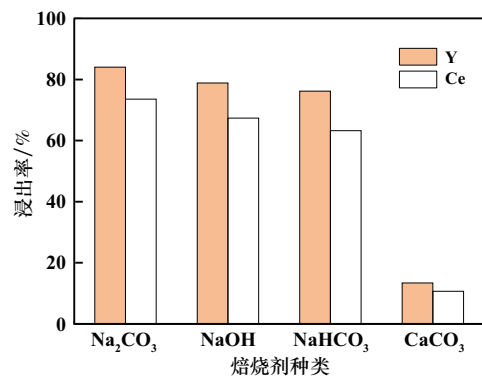


图4 焙烧剂种类对稀土浸出率的影响

Fig.4 Effect of different roasting agent on leaching rates of REE

3.2.2 焙烧温度对稀土浸出率的影响

YAG 与Na₂CO₃质量比1:2,其他条件不变,焙烧温度对稀土浸出率的影响见图5。晶体分解率在很大程度上受焙烧温度的影响^[14]。由图5可知,焙烧温度升高,YAG 分解率提高,稀土浸出率相应提高。焙烧温度500 °C时,稀土浸出率不到1%,说明此时YAG 与Na₂CO₃没有开始反应,YAG 结构也没有发生变化,500~800 °C时,浸出率均低于40%,800~900 °C浸出率迅速提高,且Na₂CO₃熔点为851 °C,说明此时两者

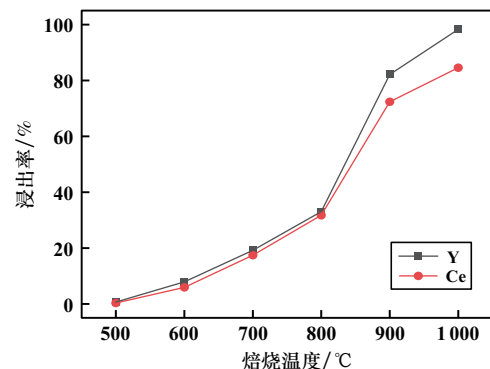


图5 焙烧温度对稀土浸出率的影响

Fig.5 Effect of roasting temperature on leaching rates of REE

发生反应,900 °C时 Y 浸出率为 82.14%,Ce 浸出率为 72.34%,1 000 °C时 Y 浸出率高达 98%,说明两者基本完全反应。综合考虑能耗与浸出率,确定焙烧温度为 900 °C。

3.2.3 焙烧时间对稀土浸出率的影响

焙烧温度 900 °C,其他条件不变,焙烧时间对稀土浸出率的影响见图 6。由图 6 可知,稀土浸出率随着焙烧时间增加而升高。焙烧 0.5~2.0 h,浸出率提高迅速,说明在此期间,YAG 与碳酸钠充分反应,2.0 h 时 Y 和 Ce 浸出率分别为 82.65%和 73.24%,2.0 h 后,Y 浸出率还有上升趋势,Ce 浸出率变化趋于平缓。综合考虑能耗等因素,确定焙烧时间为 2.0 h。

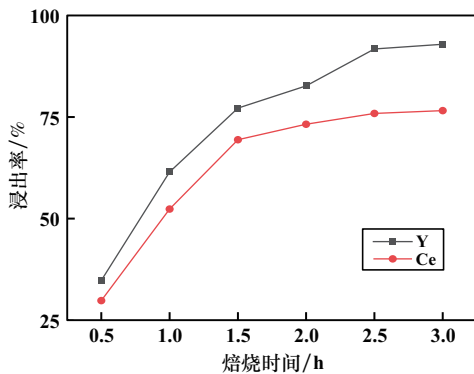


图 6 焙烧时间对稀土浸出率的影响

Fig.6 Effect of roasting time on leaching rates of REE

3.2.4 焙烧剂用量对稀土浸出率的影响

焙烧时间 2 h,其他条件不变,YAG 与 Na₂CO₃ 质量比对稀土浸出率的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着碳酸钠用量增大,稀土浸出率先提高再降低,当 YAG 与碳酸钠质量比 1:0.5 时,Y 和 Ce 浸出率都达到最大值,分别为 92.97%和 82.45%。碳酸钠用量过高,一是会产生烧结现象,不利于 YAG 的分解,从而影响 YAG 与碳酸钠的反应,后续洗涤难度也会增大;二是

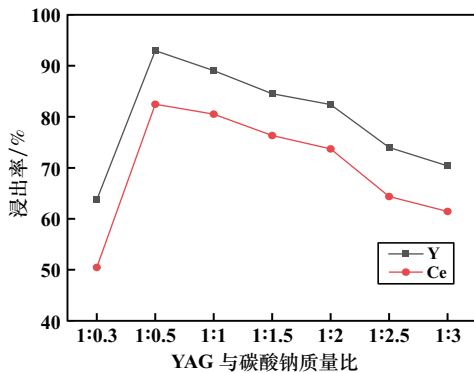


图 7 碳酸钠添加量对稀土浸出率的影响

Fig.7 Effect of sodium carbonate dosage on leaching rates of REE

焙烧产物中有未反应的碳酸钠,在酸浸过程中会与酸反应,从而降低浸出率。确定 YAG 与碳酸钠质量比为 1:0.5。

3.3 酸浸实验

3.3.1 浸出温度对稀土浸出率的影响

以 YAG 与 Na₂CO₃ 质量比 1:0.5、900 °C 下焙烧 2 h 后所得焙烧料用于酸浸实验。由直接浸出实验结果可知,盐酸的浸出效果好,以下采用盐酸对焙烧产物进行酸浸。

盐酸浓度 3 mol/L、液固比 20 mL/g、浸出时间 2.0 h,浸出温度对稀土浸出率的影响如图 8 所示。由图 8 可知,30~60 °C 时,随着浸出温度上升,稀土浸出率逐渐升高;60 °C 时焙烧产物中稀土浸出率达到最大,Y 浸出率为 91.96%,Ce 浸出率为 81.23%;60~80 °C 时,随着浸出温度升高,焙烧产物中稀土浸出率略有下降,但均保持在较高水平。可能是因为 30~60 °C 时,随着浸出温度升高,焙烧产物活性增大,然而因为温度较高,会使易挥发的盐酸出现部分挥发,从而导致浸出率下降。同时兼顾浸出率与成本,综合考虑,浸出温度 60 °C 为宜。

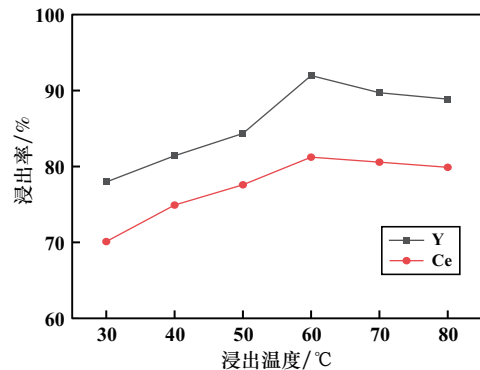


图 8 浸出温度对稀土浸出率的影响

Fig.8 Effect of leaching temperature on leaching rates of REE

3.3.2 盐酸浓度对稀土浸出率的影响

浸出温度 60 °C,其他条件不变,盐酸浓度对稀土浸出率的影响如图 9 所示。由图 9 可知,稀土浸出率随着盐酸浓度增大先增大再趋于平缓然后下降。盐酸浓度 3 mol/L 时,Y 和 Ce 浸出率分别为 92.79%和 83.48%。确定适宜的盐酸浓度为 3 mol/L。

3.3.3 浸出液固比对稀土浸出率的影响

盐酸浓度 3 mol/L,其他条件不变,浸出液固比对稀土浸出率的影响如图 10 所示。由图 10 可知,稀土浸出率随着浸出液固比增大先增大后减小,浸出液固比 20 mL/g 时,Y 和 Ce 浸出率达到最大,分别为 91.73%和 82.13%;浸出液固比大于 20 mL/g 后,稀土

浸出率有下降趋势,说明盐酸不宜过多。综合多方面因素,确定适宜的浸出液固比为 20 mL/g。

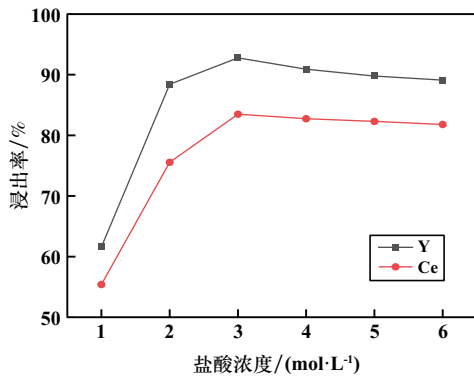


图9 盐酸浓度对稀土浸出率的影响

Fig.9 Effect of hydrochloric acid concentration on leaching rates of REE

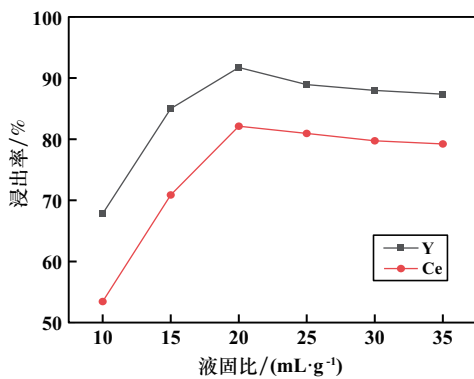


图10 浸出液固比对稀土浸出率的影响

Fig.10 Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of REE

3.3.4 浸出时间对稀土浸出率的影响

液固比 20 mL/g,其他条件不变,浸出时间对稀土浸出率的影响如图 11 所示。由图 11 可知,浸出时间 0.5~1.0 h 时,稀土浸出率有所升高,说明焙烧产物与盐酸发生反应,稀土元素被浸出;浸出时间 1.0 h 时 Y 和 Ce 浸出率都达到最大,分别为 94.03% 和 84.25%;浸出时间超过 1.0 h 后,稀土浸出率变化趋于平缓,说明反应完成。由结果可推断,焙烧产物与盐酸的反应速度较快,盐酸浸出过程受浸出时间的影响较小。综合考虑,浸出时间确定为 1.0 h。

3.3.5 助浸剂对稀土浸出率的影响

浸出过程中添加适量的助浸剂有利于反应正向进行,从而提高稀土元素的浸出率。浸出时间 1.0 h,其他条件不变,助浸剂双氧水添加量对稀土浸出率的影响如图 12 所示。由图 12 可知,添加双氧水对浸出率有一定提高,其中 Y 浸出率提高更明显,双氧水添加量为 1.2 mL/g 时,Y 和 Ce 浸出率分别为 97.23% 和

84.91%。使用助浸剂可以减少碳酸钠用量、缩短浸出时间,达到更低成本下的高效浸出。

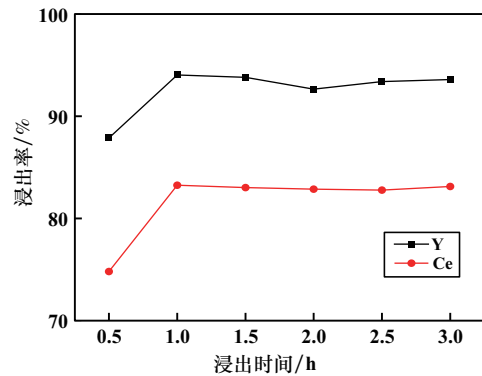


图11 浸出时间对稀土浸出率的影响

Fig.11 Effect of leaching time on leaching rates of REE

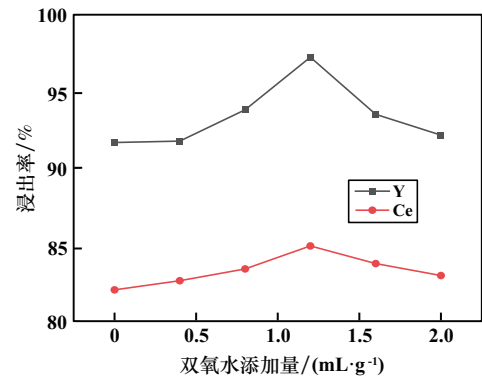


图12 双氧水添加量对稀土浸出率的影响

Fig.12 Effect of hydrogen peroxide dosage on leaching rates of REE

3.4 物相变化

YAG 和 Na_2CO_3 按质量比 1:0.5 混合后均匀置于坩埚中,放入箱式高温烧结炉中进行焙烧,再对原矿和 900 °C 焙烧产物进行 X 射线衍射分析,结果如图 13 所示。由图 13 可知,焙烧前 YAG 的主要衍射峰为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$,少部分衍射峰对应 Y_2O_3 衍射峰,900 °C 焙烧后晶形有明显变化,此时没有 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 衍射峰,出现

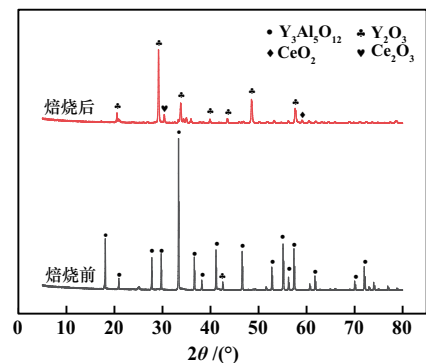


图13 YAG 焙烧前后 XRD 图谱对比

Fig.13 XRD patterns of YAG before and after roasting

了大量 Y_2O_3 衍射峰,说明此时 YAG 与 Na_2CO_3 发生了反应,YAG 的石榴石结构被破坏,Y 和 Ce 大多以简单氧化物形式出现,后续能更好地用盐酸浸出。

4 结论

1) YAG 荧光粉结构稳定,直接浸出时无法有效提取其中的稀土元素。

2) 综合考虑成本以及能耗,当 YAG 与 Na_2CO_3 质量比 1:0.5、900 °C 下焙烧 2.0 h,再用 3 mol/L 盐酸在 60 °C、液固比 20 mL/g、双氧水添加量 1.2 mL/g 条件下浸出 1.0 h,Y 和 Ce 的浸出率可达 97.23% 和 84.91%。

参考文献(References):

- [1] 魏翔,夏安全,赵迪,等. 推动我国稀土产业可持续发展的策略探讨[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊1):5-9.
WEI Xiang, XIA Anquan, ZHAO Di, et al. Discussion on the strategy of promoting the sustainable development of China's rare earth industry[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):5-9.
- [2] 曾小勤,陈义文,王静雅,等. 高性能稀土镁合金研究新进展[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(11):2963-2975.
ZENG Xiaoqin, CHEN Yiwen, WANG Jingya, et al. Research progress of high-performance rare earth magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):2963-2975.
- [3] 何宏平,杨武斌. 我国稀土资源现状和评价[J]. 大地构造与成矿学, 2022,46(5):829-841.
HE Hongping, YANG Wubin. REE mineral resources in China: review and perspective [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(5):829-841.
- [4] TUNSU C, PETRANIKOVA M, GERGORIĆ M, et al. Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: A review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations [J]. Hydrometallurgy, 2015,156:239-258.
- [5] 纪张超. 白光 LED 用氧化物荧光粉的制备及发光性能研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2023.
JI Zhangchao. Preparation and photoluminescence properties of oxide phosphors for white LED [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [6] IPPOLITO N M, INNOCENZI V, MICHELIS I D, et al. Rare earth elements recovery from fluorescent lamps: A new thermal pretreatment to improve the efficiency of the hydrometallurgical process[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,153:287-298.
- [7] 程明宇,潘高,黄义威,等. 微波辅助盐酸浸出废弃荧光粉中的稀土元素钇和铈[J]. 金属矿山, 2022(5):153-159.
CHENG Mingyu, PAN Gao, HUANG Yiwei, et al. Leaching Y and Eu from waste phosphors using hydrochloric acid with microwave radiation [J]. Metal Mine, 2022(5):153-159.
- [8] 苏冕,梅光军,于明明,等. 铝酸盐荧光粉中绿粉与蓝粉的浮选研究[J]. 金属矿山, 2023(12):149-153.
SU Mian, MEI Guangjun, YU Mingming, et al. Flotation study of green-emitting phosphors and blue-emitting phosphors in aluminate phosphor [J]. Metal Mine, 2023(12):149-153.
- [9] 何玲,尹延伟,孙福海,等. 两步酸浸法提高铈和铽浸出率的工艺研究[J]. 中国稀土学报, 2019,37(6):697-703.
HE Ling, YIN Yanwei, SUN Fuhai, et al. Process of two-step acid leaching to increase cerium and terbium leaching rate [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2019,37(6):697-703.
- [10] 赵瑛,王碧侠,张皓淞,等. 柠檬酸浸出废旧锂离子电池中的镍钴锰[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):114-118.
ZHAO Ying, WANG Bixia, ZHANG Haosong, et al. Citric acid leaching of nickel, cobalt and manganese from spent lithium-ion batteries [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):114-118.
- [11] 陈沪飞. 电解锰渣中高温焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):100-104.
CHEN Hufei. Experimental study on roasting of electrolytic manganese slag at medium and high temperature [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):100-104.
- [12] 赵雨婷,周自圆,刘志启,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收 $FePO_4$ 研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):96-99.
ZHAO Yuting, ZHOU Ziyuan, LIU Zhiqi, et al. Simultaneous removal of impurities and recovery of $FePO_4$ from acid leaching solution of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):96-99.
- [13] 黎振源. 碱焙烧—两步酸浸法从废旧稀土荧光粉回收稀土工艺及机理的研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2017.
LI Zhenyuan. Research on process and mechanism of recovery of rare earth from waste rare earth fluorescent powders using alkaline roasting-two steps of acid leaching process [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [14] 秦玉芳,许涛,马莹,等. 从废荧光粉中回收稀土的工艺研究[J]. 稀土, 2020,41(2):78-85.
QIN Yufang, XU Tao, MA Ying, et al. Study on recovery of rare earth from waste phosphor powder [J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(2):78-85.
- 引用本文:王君妍,梅光军,于明明,等. YAG 荧光粉中稀土元素的提取[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):142-147.
WANG Junyan, MEI Guangjun, YU Mingming, et al. Extraction of rare earth elements from YAG fluorescent powder [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):142-147.